

	DIN IEC 61788-14 (VDE 0390-14)	DIN
	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	VDE

ICS 29.050

Einsprüche bis 2009-02-28

Entwurf

**Supraleitfähigkeit –
Teil 14: Supraleitende Leistungsgeräte –
Allgemeine Anforderungen an charakteristische Prüfverfahren für
Stromzuführungen, die für die Versorgung supraleitender Geräte ausgelegt sind
(IEC 90/217/CD:2008)**

Superconductivity –
Part 14: Superconducting Power Devices –
General Requirements for Characteristic Tests of Current Leads Designed for Powering
Superconducting Devices
(IEC 90/217/CD:2008)

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2008-12-01 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise als Datei per E-Mail an **dke@vde.com** in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter **www.dke.de/stellungnahme** abgerufen werden
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevante Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 48 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm gilt ab ...

Inhalt

	Seite
Einleitung.....	5
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen.....	5
3 Begriffe.....	5
4 Kurzbeschreibung	6
5 Charakteristische Prüfgegenstände.....	7
6 Charakteristische Prüfverfahren	8
7 Protokollierung	13
8 Vorsichtsmaßnahmen	14
Anhang A (informativ) Zusätzliche Informationen zu den Abschnitten 1 bis 8	15
Anhang B (informativ) Typische Stromzuführungen	16
Anhang C (informativ) Erläuternde Abbildungen, um Prüfverfahren verstehen zu helfen.....	22
Anhang D (informativ) Prüfgegenstände und Verfahren für eine HTS-Komponente.....	24
Literaturhinweise	26
Bilder	
Bild B.1 – Schematische Darstellung selbstkühlender normalleitender Stromzuführungen.....	16
Bild B.2 – Schematische Darstellung normalleitender Stromzuführungen mit Kühlung durch erzwungenen Fluss.....	17
Bild B.3 – Schematische Darstellung für Stromzuführungen bestehend aus einer normalleitenden Sektion mit Kühlung durch erzwungenen Fluss und einer HTS-Sektion in Vakuumumgebung.....	18
Bild B.4 – Schematische Darstellung für Stromzuführungen bestehend aus einer normalleitenden Sektion mit Kühlung durch erzwungenen Fluss und einer HTS-Sektion in einer Umgebung gasförmigen Heliums	19
Bild B.5 – Schematische Darstellung für Stromzuführungen bestehend aus einer normalleitenden Sektion mit Kühlung durch flüssiges N ₂ und einer durch Eigenverdampfung von Helium selbstgekühlten HTS-Sektion	20
Bild B.6 – Schematische Darstellung für Stromzuführungen bestehend aus einer normalleitenden, leitungsgekühlten Sektion und einer HTS-Sektion	21
Bild C.1 – Schematische Darstellung eines Temperaturprofils während des Tests bei Nennstrombelastung.....	22
Bild C.2 – Schematische Darstellung für die Druckabhängigkeit der Durchschlagsspannung bei der Überprüfung der Paschen-Festigkeit	22
Bild C.3 – Schematische Darstellung für die Zeitabhängigkeit des Spannungsanstiegs beim Quenchtest.....	23
Tabellen	
Tabelle 1 – Charakteristische Prüfgegenstände und Testausführungsstufen für Stromzuführungen	8
Tabelle D.1 – Charakteristische Prüfgegenstände für Stromzuführungen	24

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 90/217/CD:2008 „Superconductivity – Part 14: Superconducting Power Devices – General Requirements for Characteristic Tests of Current Leads Designed for Powering Superconducting Devices“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom TC 90 „Superconductivity“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die IEC und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf prEN nur 2 Monate beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für diesen Norm-Entwurf ist das nationale Arbeitsgremium K 184 „Supraleiter“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist in Tabelle NA.1 wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
–	IEC 60050-815	–	–
EN 61788-3:2006	IEC 61788-3:2006	DIN EN 61788-3 (VDE 0390-3):2007-03	VDE 0390-3
EN 61788-10:2006	IEC 61788-10:2006	DIN EN 61788-10 (VDE 0390-10):2007-05	VDE 0390-10

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 61788-3 (VDE 0390-3):2007-03, *Supraleitfähigkeit – Teil 3: Messen des kritischen Stromes – Kritischer Strom (Gleichstrom) von Ag- und/oder Ag-Legierung ummantelten oxidischen Bi-2212 und Bi-2223-Supraleitern (IEC 61788-3:2006); Deutsche Fassung EN 61788-3:2006*

DIN EN 61788-10 (VDE 0390-10):2007-05, *Supraleitfähigkeit – Teil 10: Messung der kritischen Temperatur – Kritische Temperatur von Verbundsupraleitern bestimmt durch ein Widerstandsmessverfahren (IEC 61788-10:2006); Deutsche Fassung EN 61788-10:2006*

**Supraleitfähigkeit –
Teil 14: Supraleitende Leistungsgeräte –
Allgemeine Anforderungen an charakteristische Prüfverfahren für
Stromzuführungen, die für die Versorgung
supraleitender Geräte ausgelegt sind**

Einleitung

Die Stromzuführung ist eine der unverzichtbaren Bestandteile für supraleitende Geräte im praktischen Einsatz wie z. B. MRI-Diagnosegeräte, NMR-Spektrometer, Apparaturen zur Züchtung von Einkristallen, SMES, Teilchenbeschleuniger wie Tevatron, HERA, RHIC und LHC, experimentelle Prüfgeräte für Kernfusionsreaktoren wie ToreSupra, TRIAM, LHD, EAS, KSTAR, W7-X, JT-60SA und ITER usw. sowie die fortschrittlichen supraleitenden Aggregate, die in der nahen Zukunft zum Einsatz kommen werden, wie Magnetschwebbahnen, supraleitende Fehlerstrombegrenzer, supraleitende Transformatoren usw.

Die wesentlichen Funktionen von Stromzuführungen sind, supraleitende Geräte mit hohen Strömen zu versorgen und die totale Wärmelast einschließlich der Wärmeleckage von Raumtemperatur zur Kryotemperatur und der Jouleschen Erwärmung durch die Stromzuführungen zu minimieren. Zu diesem Zweck ist es außerordentlich effektiv, hochtemperatursupraleitende Komponenten als Bestandteil der Stromzuführungen zu verwenden, um die totale Wärmelast abzusinken.

Auf der anderen Seite hängen die bei den supraleitenden Geräten zu verwendenden Stromzuführungstechnologien von der jeweiligen Anwendung ab, von der Erfahrung des Herstellers und dem gesammelten Know-How. Da es sich um Bestandteile handelt, ist es schwierig, die Kompatibilität, die Flexibilität zwischen den Geräten, die Bedienfreundlichkeit, die gesamte ökonomische Effizienz etc. zu beurteilen. Dies mag den Fortschritt der Technologie supraleitender Ausrüstungen, ihr Wachstum und kommerzielle Aktivitäten als Gegenstand von Interesse behindern.

Demzufolge wird geurteilt, dass es unter diesen Umständen für industrielle Anwendungen effektiv ist, die Definition von Stromzuführungen, die bei supraleitenden Geräten zum Einsatz kommen, zu klären und übliche charakteristische Prüfverfahren als allgemeine Regeln zu standardisieren.

1 Anwendungsbereich

Diese Norm legt die allgemeinen Anforderungen an charakteristische Tests von Stromzuführungen für die Versorgung supraleitender Ausrüstungen fest.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60050-815:2000, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 815: Superconductivity* **JIS H 7005:1999, Superconducting Terms**

IEC 61788-3:2006, *Superconductivity – Part 3: Critical current measurement – DC critical current of Ag-sheathed Bi-2212 and Bi-2223 oxide superconductors*

IEC 61788-10:2006, *Superconductivity – Part 10: Critical temperature measurement – Critical temperature of Nb-Ti, Nb₃Sn, and Bi-system oxide composite superconductors by a resistance method*

3 Begriffe

In dieser Norm verwendete Schlüsselbegriffe sind in Übereinstimmung mit **IEC 60050-815:2000** sowie im Folgenden definiert.

3.1

Stromzuführung

Netzanschlussleitung

Leiter mit einer Isolation und einem Kühlkanal, insbesondere, wenn er von Raumtemperatur zu einer Kryotemperatur führt, um elektrischen Strom in ein Gerät einzuspeisen

[IEC 60050-815-06-47]

3.2

Normalleitende Stromzuführung (konventionelle Stromzuführung)

Stromzuführung, die lediglich aus einer normalleitenden Sektion besteht

3.3

Supraleitende Stromzuführung

Stromzuführung, die eine supraleitende Sektion beinhaltet

ANMERKUNG Eine supraleitende Stromzuführung besteht aus einer normalleitenden Sektion von Raumtemperatur zu einer Zwischentemperatur und einer supraleitenden Sektion von der Zwischentemperatur zur Kryotemperatur. In dieser Norm besteht die supraleitende Sektion meistens aus einem Hochtemperatursupraleiter (HTS).

3.4

Gas-frei gekühlte Stromzuführung

Stromzuführung, die durch ein Leitungskühlungsverfahren gekühlt wird

3.5

Gasgeköhlte Stromzuführung

Stromzuführung, die durch ein Kühlgas gekühlt wird

ANMERKUNG In einigen Fällen wird die Gaskühlung bewerkstelligt zwischen der Kühlung durch einen Gasfluss innerhalb der Stromzuführungen und (zusätzlicher) Konvektionskühlung an der äußeren Oberfläche.

3.6

selbstgeköhlte Stromzuführung, dampfenthalpiegeköhlte Stromzuführung

Stromzuführung, die in der Lage ist, von einem verdampften Gas gekühlt zu werden, das durch die Wärmelast der Stromzuführungen im Kühlmittel erzeugt worden ist

3.7

Wärmeleckage (stromlose Wärmeleckage)

Wärme, die bei Operationsstrom Null ohne irgendeine Joulesche Erwärmung vom Bereich höherer Temperatur der Stromzuführung zum Bereich niedrigerer Temperatur geleitet wird

3.8

Wärmelast

Gesamte Wärme, die durch die Stromdurchführungen beim Betrieb mit Stromfluss in ein Kryosystem eingebracht wird

3.9

Nennstrom-Wärmelast

Wärmelast beim Betrieb mit Nennstrom

4 Kurzbeschreibung

Die Versorgung supraleitender Ausrüstungen wird durch Komponenten bewerkstelligt, die die elektrische Verbindung zwischen der Umgebung bei Raumtemperatur und der Kryotemperatur der versorgten Ausrüstung herstellen. Diese Komponenten werden Stromzuführungen genannt. Da sie in einem Temperaturgradienten arbeiten und Strom in die Kryoumgebung transportieren, sind sie eine der Hauptquellen für Wärmeleckage nach innen.

Die Stromzuführungen können in zwei Typen unterteilt werden:

- (a) Normalleitende Stromzuführungen, die gänzlich aus einer normalleitenden Sektion gefertigt sind. Sie werden üblicherweise an ihrem kalten Ende an einen supraleitenden (sl) Bus oder eine Verbindung, der bzw. die zu dem zu versorgenden Gerät führt, angeschlossen.
- (b) Hochtemperatursupraleitende (HTS-) Stromzuführungen, die eine Sektion aus HTS-Material beinhalten. Eine normalleitende Sektion ist notwendig, um den Strom von Raumtemperatur zu dem warmen Ende der HTS-Sektion zu leiten. Letztere muss bei einer hinreichend niedrigen Temperatur gehalten werden, um sicher zu stellen, dass sie bei maximalem Nennstrom der Zuführung supraleitend bleibt. Das kalte Ende der HTS-Sektion wird üblicherweise an das Gerät mittels eines sl-Busses angeschlossen.

Abhängig von dem Kühlverfahren können die Zuführungen entweder Gas-frei oder mittels Gas gekühlt werden. Beide Arten von Kühlverfahren können verwendet werden, falls die Zuführung in zwei, hydraulisch getrennte, Sektionen unterteilt wird. Falls in dem zu versorgenden Gerät Niedertemperatur- (en: „low temperature superconducting“, LTS-) Material eingesetzt wird, besteht die Verbindung zu der Zuführung üblicherweise aus LTS-Kabeln oder -Drähten.

Optimiert leiten normalleitende selbstgekühlte Stromzuführungen 1,1 W/kA [1] bis 1,2 W/kA [2] in das Heliumbad. Dieser Wert kann durch die Verwendung von HTS-Material deutlich verringert werden. HTS-Stromzuführungen sind ausführlich studiert, ausgelegt und getestet worden und sind bereits in großskaligen Systemen integriert [3], [4].

Das Design von Stromzuführungen ist auf besondere Weise mit dem System, in dem sie funktionieren haben, verbunden. Die Auswahl der Materialien, das Kühlverfahren, die Geometrie, die elektrischen Eigenschaften und die zulässigen Kühlmittelverbrauchswerte werden durch die vom gesamten System festgelegten Randbedingungen stark beeinflusst. Systemanforderungen sind elektrischer, kryogener und mechanischer Natur und beinhalten das Folgende:

- Maximalen Arbeitsstrom, Betriebsmodus, (Anstiegs)rate der Stromrampe, Isolationsspannung, Zeitkonstante der Schaltung; umgebende Magnetfelder;
- Verfügbarkeit des Kühlmittels, Ein- und Auslasstemperatur sowie Druck des Kühlmittels, zulässige Wärmelasten, Zeitdauer, während der die Zuführung sicher arbeiten muss in dem Fall, dass die Kühlmittelversorgung zusammenbricht;
- Das Volumen, das für die Integration zur Verfügung steht, einschließlich mechanischer Trägerstruktur, Vakuumisolation und Verbindung zu den hydraulischen und elektrischen Schnittstellen.

ANMERKUNG 1 Die Wärmeleckage selbstgekühlter Stromzuführungen sollte in dem Fall einer großen Stromkapazität 1,2 W/kA betragen.

ANMERKUNG 2 Typische Stromzuführungen basierend auf diesen Prinzipien werden in Anhang B gezeigt.

5 Charakteristische Prüfgegenstände

Die folgenden Kapitel beschreiben die Qualifizierungsprüfungen, die an einer Stromzuführung sowohl bei Raum- als auch bei Kryotemperaturen durchgeführt werden sollten, um ihr elektrisches und thermisches Verhalten zu überprüfen. Es wird angenommen, dass bei dem Design der Stromzuführung allgemeine Verwendbarkeit in Betracht gezogen wurde. Vor der Anwendung auf ein aktuelles System ist es ebenso notwendig, die Optimierung der Stromzuführung im Einklang mit den vom jeweiligen System auferlegten Rahmenbedingungen durchzuführen. Die charakteristischen, in Tabelle 1 gezeigten Prüfgegenstände sollten den Anwender befähigen nachzuprüfen, ob die Stromzuführung die spezifizierten Anforderungen erfüllt, und zu beurteilen, ob die Prüfgegenstände der Ausführungsstufe der Stromzuführung entsprechen.

Tabelle 1 – Charakteristische Prüfgegenstände und Testausführungsstufen für Stromzuführungen

	Charakteristische Prüfkategorie	Prüfgegenstände	Charakteristische Testausführungsstufe		
			F & E	Katalog	Erhalten
1	Mechanische Eigenschaften	Überprüfung der Struktur		Ja	Ja
		Überprüfung des Zug-Dehnungseffekts	Ja		
2	Thermische Eigenschaften	Überprüfung der Wärmeleckage im stromlosen Fall	Ja	Ja	
		Überprüfung der Wärmelast bei Nennstrom	Ja	Ja	
3	Elektrische Eigenschaften	Test bei Nennstrombelastung	Ja	Ja	
		Überprüfung des Kontaktwiderstands	Ja		
		Hochspannungstest	Ja	Ja	
		Überprüfung des Spannungsabfalls	Ja	Ja	
4	Hydraulische Eigenschaften	Überprüfung des Druckabfalls bei Nenngasfluss	Ja	Ja	
		Dichtheitstest	Ja		
5	Eigenschaften der Sicherheitsreserven	Test bei Ausfall des Kühlmittels	Ja	Ja	
		Quenchtest	Ja		
		Überprüfung bei Maximaldruck	Ja	Ja	

ANMERKUNG 1 „F & E“ meint die Testphase grundlegender Forschung oder Versuchsproduktionen von Stromzuführungssystemen.

ANMERKUNG 2 „Katalog“ meint die Testphase, sobald „F & E“ durchgeführt worden ist, oder Massenproduktion von Stromzuführungen.

ANMERKUNG 3 „Erhalten“ meint die Testphase nach Einbau des Stromzuführungssystems an Ort und Stelle.

ANMERKUNG 4 Charakteristische Prüfgegenstände und Verfahren für die Komponenten einer HTS-Sektion werden in Anhang D aufgeführt.

6 Charakteristische Prüfverfahren

6.1 Überprüfung der Struktur

6.1.1 Zielsetzung

Dieser Test muss die Abmessungen, geeignete Materialien, Struktur, Zustand der Struktur etc. sowie die thermischen Isolationseigenschaften und die Dichtheit des Behälters im Zielsystem überprüfen.

6.1.2 Verfahren

Der Test der Struktur muss der Überprüfung von Abmessungen, geeigneten Materialien, Struktur, Zustand der Struktur etc. dienen.

Der Test der Struktur bei tiefen Temperaturen muss die optische Überprüfung des Stands der Frostbildung auf der Oberfläche des Kryostaten, der mit Kühlmittel gefüllt oder an ein Kühlgerät angeschlossen ist, zum Gegenstand haben. Bei Kryostaten mit Vakuum als thermischer Isolationsschicht muss bestätigt werden, dass es keine Anomalie in der Schicht gibt.

6.1.3 Ergebnisse

Die Testergebnisse müssen mit den Spezifikationen verglichen und vollständig berichtet werden.

6.2 Überprüfung des Zug-Dehnungseffekts

6.2.1 Zielsetzung

Dieser Test muss den mechanischen Zug-Dehnungseffekt der Stromzuführungen bei Raumtemperatur und bei tiefen Temperaturen bestätigen.

6.2.2 Verfahren

Ein Niveau der mechanischen Zug-Dehnung muss bei Raumtemperatur und bei niedrigen Temperaturen im Zielsystem simuliert und mechanische Zug-Dehnung muss hinzugefügt werden bis zum Maximalwert unterhalb des elastischen Limits des Supraleiters.

ANMERKUNG 1 Die maximale Last muss in Abhängigkeit von der Sicherheitsreserve definiert werden und beträgt typischerweise das 1,1fache des Spezifikationswertes.

ANMERKUNG 2 Der Test muss eine spezifizierte Anzahl von Wiederholungen durchlaufen, wobei zwischen der Bedingung der elektromagnetischen Belastung und der thermischen Belastung unterschieden wird.

6.2.3 Ergebnisse

Die Testergebnisse müssen mit den Spezifikationen verglichen und vollständig berichtet werden.

6.3 Überprüfung der thermischen Eigenschaften

6.3.1 Überprüfung der Wärmeleckage im stromlosen Fall

6.3.1.1 Zielsetzung

Dieser Test muss die Wärmeleckage im stromlosen Fall messen, die bei Strom Null keinen Beitrag Joulescher Erwärmung aufweist und die verbunden ist mit der Wärmeleitung vom Ende bei Raumtemperatur zu dem Bereich bei einer Zwischentemperatur, von dem Bereich bei Zwischentemperatur zu dem Ende bei Niedertemperatur oder die verbunden ist mit der Wärmeleitung vom Ende der Stromzuführungen bei Raumtemperatur zu dem Ende bei Niedertemperatur.

6.3.1.2 Verfahren

Die Wärmeleckage muss gemessen werden mit Hilfe des Verfahrens der Verdampfung flüssigen Kühlmittels, des Verfahrens der Enthalpieänderung eines Kühlmittelgases bei erzwungenem Fluss oder des Verfahrens der thermischen Leitung unter Verwendung eines Kryokühlers abhängig von den Kühlbedingungen der zu testenden Stromzuführungen.

Verdampfungsverfahren:

Die Stromzuführungen werden für die Überprüfung der Wärmeleckage in einem speziellen Kryostaten mit bekannten Werten für die Hintergrundwärmeleckage in die Messregion installiert. In dem Kryostaten werden die kalten Enden der Stromzuführungen mit einem geeigneten Kühlmittel wie z. B. flüssigem Helium und/oder flüssigem Stickstoff gekühlt. Die Massenflussrate des verdampften Kühlmittels wird am Auslass des Kryostaten gemessen. Die Wärmeleckage bedingt durch die Stromzuführungen wird ermittelt, indem die Zunahme in der Massenflussrate des verdampften Kühlmittels untersucht wird, wenn die Stromzuführungen installiert werden. Dieselbe Messung sollte in dem Fall durchgeführt werden, wenn ein Zwischentemperaturbereich existiert.

Enthalpieänderungsverfahren:

Die Stromzuführungen werden in einem Kryostaten mit bekannten Werten für die Hintergrundwärmeleckage in die Messregion installiert. Kühlmittelgase wie etwas superkritisches Helium werden mit kontrollierten Werten für Temperatur und Massenfluss bei erzwungenem Fluss an die gekühlten Bereiche der Stromzuführungen gebracht. Die durch die Stromzuführungen bedingte Wärmeleckage wird anhand der Enthalpieänderungen der Kühlmittelgase zwischen Einlass und Auslass der Stromzuführungen ermittelt.

Verfahren der thermischen Leitung:

Die Stromzuführungen werden in einem Kryostaten mit bekannten Werten für die Hintergrundwärmeleckage in die Messregion installiert. Die gekühlten Bereiche der Stromzuführungen werden thermisch mit den

Kühlköpfen des Kryokühlers verbunden. Die durch die Stromzuführungen bedingte Wärmeleckage wird anhand der Zunahme der Wärmelasten an den Kühlköpfen des Kryokühlers berechnet.

ANMERKUNG 1 Bei dem Verdampfungsverfahren verbleibt ein Teil des verdampften Kühlmittels in dem Kryostaten als ein Gas bei niedrigen Temperaturen. Da die Dichte eines Gases bei niedrigen Temperaturen hoch ist, ist es notwendig, die Menge verdampften Gases zu korrigieren, wenn die Massenflussrate am Auslass des Kryostaten gemessen wird.

ANMERKUNG 2 In F & E wird der Wert für die durch die Stromzuführungen bedingte Wärmeleckage anhand der numerischen Lösung der Energiebilanzgleichung entlang des Leiters der Stromzuführung abgeschätzt. Die Temperaturen der kalten und warmen Enden werden als Randbedingungen für die Energiebilanzgleichung angenommen. Die Form der Energiebilanzgleichung hängt von der Struktur der Stromzuführungen ab. In dem Fall gasgekühlter resistiver Stromzuführungen kann die Energiebilanzgleichung aus solchen Termen wie denen für Wärmeleitung, Erzeugung ohmscher Wärme und Wärmeaustausch mit dem Kühlgas bestehen.

6.3.1.3 Ergebnisse

Die Testergebnisse müssen mit den Spezifikationen verglichen und vollständig berichtet werden.

6.3.2 Überprüfung der Wärmelast bei Nennstrom

6.3.2.1 Zielsetzung

Bei diesem Test muss der Betrag der Wärmelast bei Nennstrom gemessen werden.

6.3.2.2 Verfahren

Die Verfahren müssen denen entsprechen, die bei der Überprüfung der Wärmeleckage im stromlosen Fall angewandt werden.

6.3.2.3 Ergebnisse

Die Testergebnisse müssen mit den Spezifikationen verglichen und vollständig berichtet werden.

6.4 Test bei Nennstrombelastung

6.4.1 Zielsetzung

Dieser Test muss die Leistungsmerkmale der Stromzuführungen bei Nennstrom unter normalen Betriebsbedingungen bestätigen.

6.4.2 Verfahren

Um die Leistungsmerkmale der Stromzuführungen mit den Designwerten zu vergleichen, muss das Temperaturprofil gemessen werden. Die Messpunkte der Temperatur müssen zumindest die drei Positionen am Raumtemperaturende, im Zwischentemperaturbereich und am Niedertemperaturende sein. Es sei angemerkt, dass die Temperatur des Raumtemperaturendes durch Randbedingungen wie Größe und Kühlbedingung der Stromschiene etc. beeinflusst wird.

Der Temperaturanstieg muss üblicherweise mit Hilfe des Thermometerverfahrens oder des Widerstandsverfahrens gemessen werden.

Vor dem Test müssen alle Kühlbedingungen des Kühlergerätes, des Kühlmittellevels oder andere bestätigt werden.

Der Strom der Zuführungen muss so lange bei dem Nennwert gehalten werden, bis die Kühlbedingung den Gleichgewichtszustand erreicht hat.

Ein typisches Beispiel eines Temperaturprofils während des Tests bei Nennstrombelastung wird in Anhang C.1 gezeigt.

6.4.3 Ergebnisse

Die Testergebnisse müssen mit den Spezifikationen verglichen und vollständig berichtet werden.

6.5 Überprüfung der Kontaktwiderstands

6.5.1 Zielsetzung

Bei diesem Test muss der Kontaktwiderstand zwischen HTS-Teilen und normalleitenden Teilen in Zwischentemperaturbereichen gemessen werden. Der Kontaktwiderstand zwischen HTS-Teilen und LTS-Teilen an Niedertemperaturenden muss gemessen werden, falls es für die Stromzuführungen gefordert ist.

6.5.2 Verfahren

Die Messung des totalen Kontaktwiderstands einschließlich des Zielkontaktbereichs muss mit Hilfe des Vierpunktverfahrens durchgeführt werden. Die Testergebnisse müssen hinsichtlich zusätzlicher Widerstände bedingt durch andere Sektionen außer der des Zielkontakts korrigiert werden.

ANMERKUNG Bei Stromzuführungen mit geringer Stromtragfähigkeit unter wenigen kA kann der Einfluss der zweidimensionalen Stromverteilung auf den Kontaktwiderstand außer Acht gelassen werden. Bei Stromzuführungen mit hoher Belastbarkeit ist es indes notwendig, bei der Messung und der Korrektur anhand von Analyse oder Simulation die Stromverteilung an der Zielverbindung zu berücksichtigen. Daher ist es sehr schwierig, einen genauen Wert für den Kontaktwiderstand zu erhalten. Aber auch in diesem Fall ist es notwendig, zu bestätigen, dass der Kontaktwiderstand zumindest unterhalb des Toleranzwertes liegt, wenn die Messung mit Hilfe von Analyse oder Simulation unter Berücksichtigung der zweidimensionalen Stromverteilung an der Zielverbindung korrigiert wird.

6.5.3 Ergebnisse

Die Testergebnisse müssen mit den Spezifikationen verglichen und vollständig berichtet werden.

6.6 Überprüfung des Spannungsabfalls

6.6.1 Zielsetzung

Dieser Test muss bestätigen, dass der Spannungsabfall über die Stromzuführungen bei Nennstrom den Designberechnungen entspricht.

6.6.2 Verfahren

Die Kühlbedingungen müssen mit denen beim Test bei Nennstrombelastung übereinstimmen.

Der Spannungsabfall muss mit Hilfe von Spannungsabgriffen zwischen dem Raumtemperaturende und dem Niedertemperaturende gemessen werden.

6.6.3 Ergebnisse

Die Testergebnisse müssen mit den Spezifikationen verglichen und vollständig berichtet werden.

6.7 Hochspannungstest

6.7.1 Zielsetzung

Dieser Test muss bestätigen, dass es keine Anomalie in der Eigenschaft des Spannungsabfalls gibt, die einen Einfluss auf das Isolationsverhalten der Stromzuführungen hat.

6.7.2 Verfahren

Vor dem Test ist mit Hilfe eines Isolationswiderstandsmessgerätes sicherzustellen, dass es keine Schwierigkeit mit dem Isolationsverhalten der Stromzuführungen gibt. Für mehr als eine fortlaufende Minute ist eine Testspannung an die Stromzuführungen anzulegen. Die angelegte Testspannung muss mit den Anforderungen des Systems, in dem die Stromzuführung eingesetzt werden muss, übereinstimmen.

Bei Stromzuführungen für Wechselstromausrüstungen muss der Test der Spezifikation der Spannungsfestigkeit für die Zielausrüstung folgen. Hierbei müssen die Normen IEC 60071-1 „Isolationskoordination – Teil 1: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen“ und IEC 60137 „Isolierte Durchführungen für Wechselspannungen über 1 000 V“ angewandt werden.

Zusätzlich zu diesen Tests mag die Paschen-Festigkeit systemseitig erforderlich sein. Paschen-Festigkeit bedeutet, dass im Falle des Zusammenbruchs des Vakuums im Kryostaten sich die Durchschlagsspannung wegen des Druckanstiegs ändert, wobei ein Minimalwert bei etwa 1 – 10 mbar erreicht wird und sie anschließend wieder ansteigt (ein typischer Verlauf ist in Anhang C.2 gezeigt). Um diesen Test durchzuführen, muss die Stromzuführung in einer Vakuumkammer installiert werden, die anschließend evakuiert wird. Nach dem Anlegen einer gegebenen Testspannung wird der Druck in der Kammer langsam

bis zum Normaldruck angehoben. Während der ganzen Zeit wird der Leckstrom zwischen der Stromzuführung und dem Erdpotential kontinuierlich aufgezeichnet.

6.7.3 Ergebnisse

Die Testergebnisse müssen mit den Spezifikationen verglichen und vollständig berichtet werden.

6.8 Überprüfung des Druckabfalls

6.8.1 Zielsetzung

Bei diesem Test muss der Druckabfall entlang der Stromzuführung bei Nenndruck und Nennmassenfluss des Kühlgases gemessen werden.

6.8.2 Verfahren

Druckdifferenzen des Kühlgases zwischen Einlass und Auslass der Stromzuführung müssen mit einem Manometer erfasst werden. Der Absolutwert des Druckes am Einlass und/oder Auslass der Stromzuführung muss angegeben werden.

6.8.3 Ergebnisse

Die Testergebnisse müssen mit den Spezifikationen verglichen und vollständig berichtet werden.

6.9 Überprüfung der Dichtheit

6.9.1 Zielsetzung

Dieser Test muss die Anpassungsfähigkeit bzgl. der Dichtheit zwischen Stromzuführungen und supraleitender Ausrüstung bestätigen.

6.9.2 Verfahren

Gasgekühlte Stromzuführungen sind in einem Kryostaten, bei dem das luftseitig geöffnete Ende verschlossen wird, zu installieren und die Dichtheit mit Hilfe eines Lecktesters zu bestätigen.

Bei gasfrei gekühlten Stromzuführungen muss der Test, falls gefordert, durchgeführt werden, indem die Stromzuführungen in dem Kryostaten installiert werden.

6.9.3 Ergebnisse

Die Testergebnisse müssen mit ein jeder Spezifikationen basierend auf dem Typ der Stromzuführungen verglichen und vollständig berichtet werden.

ANMERKUNG Die Testergebnisse müssen mit ein jeder Spezifikation der gasgekühlten Stromzuführungen oder der gasfrei gekühlten Stromzuführungen abhängig von verschiedenen Designbedingungen für die Hydraulikdruckfestigkeit und die Dichtheit basierend auf den Betriebsbedingungen, Umweltbedingungen etc. der supraleitenden Geräte verglichen werden.

6.10 Überprüfung der Sicherheitsreserven

6.10.1 Überprüfung bei Ausfall des Kühlmittels

6.10.1.1 Zielsetzung

Dieser Test muss der Überprüfung der Haltezeit für einen Sicherheitsbetrieb im Falle der Unterbrechung der Kühlmittelversorgung dienen.

ANMERKUNG Dieser Test wird üblicherweise bei gasgekühlten Stromzuführungen durchgeführt.

6.10.1.2 Verfahren

Die Spannungsabgriffe und einige Thermometer müssen an der Stromzuführung angebracht werden. Es müssen zeitliche Änderungen im Spannungsabfall über die Stromzuführung und maximale Temperaturanstiege an den Messpunkten erfasst werden. Die Kühlmittelversorgung muss bei Nennstrom unterbrochen und anschließend die Spannungsänderungen und maximalen Temperaturanstiege gemessen werden, wobei es erforderlich ist, dass der Anteil des maximalen Temperaturanstiegs in der Stromzuführung durch Berechnung und/oder Simulation, falls erstellt, ermittelt wird, und dass das Thermometer auf diesem Teil aufsitzt.

6.10.1.3 Ergebnisse

Die Testergebnisse müssen mit den Spezifikationen verglichen und vollständig berichtet werden.

6.10.2 Quenchtest

6.10.2.1 Zielsetzung

Dieser Test muss der Überprüfung der Sicherheitsreserven nach dem Entstehen eines normalleitenden Bereichs in der HTS-Komponente der Stromzuführung dienen. Bei der HTS-Komponente ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der normalleitenden Zone insbesondere im Niederspannungsbereich sehr niedrig. Nachdem der Spannungsabfall der HTS-Komponente jedoch einen Schwellwert erreicht hat, steigt er rasch an. Gleichzeitig steigt die Temperatur der HTS-Komponente schnell an und verursacht das thermische Weglaufen der HTS-Komponente. Der Strom, der an den Stromzuführungen anliegt, muss rasch abgesenkt werden, nachdem der Quench an der HTS-Komponente detektiert worden ist, um das Durchbrennen der Stromzuführungen zu vermeiden. Um den Quench der HTS-Komponente zu detektieren, ist ein nachweisbarer Spannungspegel notwendig, der oberhalb des Rauschniveaus liegt. Daher ist es sehr wichtig, die Zeitdauer vom nachweisbaren Spannungspegel, der für eine Quenchdetektion geeignet ist, bis zum limitierenden Spannungsniveau für das thermische Weglaufen zu messen.

6.10.2.2 Verfahren

Die Spannungsabgriffe, einige Thermometer und benötigte Heizgeräte müssen auf der Stromzuführung montiert werden. An den Stromzuführungen wird Nennstrom angelegt. Der normalleitende Teil wird in der HTS-Komponente zwingend mit einem Heizgerät und/oder einer steigenden Temperatur des Teiles der HTS-Komponente bei höherer Temperatur, indem der Kühlmittelfluss oder der Kryokühler gestoppt wird, erzeugt und der Quench breitet sich aus. Es wird die Zeitdauer von dem für die Quenchdetektion geeigneten Spannungswert bis zum Anwachsen auf den Spannungswert für das thermische Weglaufen gemessen. Die Sicherheitsreserve für die HTS-Stromzuführung wird errechnet. Eine schematische Zeitabhängigkeit des Anwachsens der Spannung beim Quenchtetst wird in Anhang C.3 gezeigt.

6.10.2.3 Ergebnisse

Die Testergebnisse müssen mit den Spezifikationen verglichen und vollständig berichtet werden.

6.10.3 Überprüfung bei Maximaldruck

6.10.3.1 Zielsetzung

Dieser Test muss die Unversehrtheit der Stromzuführung unter der Bedingung maximalen Druckes bestätigen. Der Wärmetauscher der Stromzuführung hat im Fehlerfall einem Maximaldruck standzuhalten, der höher ist als im normalen Betrieb.

6.10.3.2 Verfahren

Die Stromzuführung wird bei Raumtemperatur bis zum Maximaldruck unter Druck gesetzt, indem das Gas mit niedrigem Taupunkt verwendet wird. Die Unversehrtheit der Stromzuführung wird durch optische Überprüfung und den Dichtheitstest bestätigt.

ANMERKUNG Falls nötig, werden Druck- und einige Dehnmessgeräte an der Stromzuführung befestigt. Die Gefahr einer Druckschädigung durch das Gas sollte durch die kontinuierliche Überwachung der Sensoren vermieden werden. Aus Sicherheitsgründen wird die übliche Drucküberprüfung durchgeführt, indem eine Flüssigkeit wie z. B. Wasser verwendet wird. Es ist jedoch notwendig, dass die Überprüfung bei Maximaldruck unter Verwendung von Gas durchgeführt wird, sodass eine Verstopfung der Kryoausrüstung wie der Stromzuführungen durch Feuchtigkeitsrückstände vermieden wird.

6.10.3.3 Ergebnisse

Die Testergebnisse müssen mit den Spezifikationen verglichen und vollständig berichtet werden.

7 Protokollierung

Die folgenden Daten müssen angegeben werden:

- ein Überblick über die Stromzuführungen;
- die Prüfbedingungen;

- charakteristische Testergebnisse im Vergleich zu den Spezifikationen;
- die dadurch erzielten Rückschlüsse.

8 Vorsichtsmaßnahmen

Vor der Durchführung der charakteristischen Tests ist sicherzustellen, dass die Testdesigner und involvierte Personen an die folgenden Dinge erinnert worden sind:

8.1 Elektrische Überprüfungen

Die vorbeugenden Maßnahmen und Gegenmaßnahmen für elektrische Gefahren müssen getroffen werden, wobei elektrische Tests bei Raumtemperatur und bei niedriger Temperatur berücksichtigt werden müssen.

8.2 Kühlmittel und erzeugtes Gas

Bei Niedertemperaturtests müssen die vorbeugenden Maßnahmen und Gegenmaßnahmen für elektrische Gefahren getroffen werden bezugnehmend auf Gasaustausch, Kühlmittelleinspeisung, Kühlmittelleckage, physikalischen Kontakt mit Kühlmittel, permanent erzeugtes Gas und vorsätzlich erzeugtes Gas.

Die Kühlmitteltests müssen auf den lokalen bzw. regionalen gesetzlichen Vorschriften basieren.

Anhang A (informativ)

Zusätzliche Informationen zu den Abschnitten 1 bis 8

A.1 Anwendungsbereich

Als geeignete Materialien für supraleitende Stromzuführungen können zusätzlich zu dem in dieser Norm spezifizierten Hochtemperatursupraleiter Supraleiter wie MgB_2 , Nb_3Sn , Nb-Ti in Abhängigkeit von den vorgesehenen Temperaturen geeignet sein.

A.2 Struktur der Stromzuführung

A.2.1 Normaleitende Stromzuführung (konventionelle Stromzuführung)

Diese Stromzuführung besteht aus einem Anschlussende oder einem Verstärkungsmaterial an beiden Enden mit Komponententeilen bestehend aus Normalleitern im Bereich vom Raumtemperaturende bis zum Niedertemperaturende in der Stromzuführungskonfiguration.

A.2.2 Supraleitende Stromzuführung

Diese Stromzuführung besteht aus einem Anschlussende oder einem Verstärkungsmaterial an beiden Enden mit Komponententeile bestehend aus Normalleitern im Bereich vom Raumtemperaturende bis zum Zwischentemperaturbereich (normaleitende Sektion) und mit Komponententeilen bestehend aus Supraleitern vom Zwischentemperaturbereich zum Niedertemperaturende (supraleitende Sektion).

ANMERKUNG Es können auch andere Definitionen für Ausdrücke für Temperaturbereiche existieren.

A.3 Geeignete Materialien

A.3.1 Normaleitende Materialien

Als normaleitende Materialien, aus denen in dieser Norm spezifizierte Stromzuführungen bestehen, werden üblicherweise Kupfermaterialien, Kupferlegierungen, Aluminiummaterialien oder Aluminiumlegierungen verwendet.

Zusätzlich können normaleitende Materialien, die in Stromzuführungen verwendet werden, verschiedene Formen annehmen wie z. B. Block, Verbund-Runddraht, Litzendraht, Verbund-Rechteckdraht, röhrenförmiger Draht, kompakter Litzendraht, Verbund-Band, laminiertes Band.

A.3.2 Supraleitende Materialien

Als supraleitende Materialien, die in einem Teil der Stromzuführungen nach dieser Norm verwendet werden sollen, werden Nb-Ti-Supraleiter, Nb_3Sn -Verbundsupraleiter, Bi-System-Oxidsupraleiter, Y-System-Oxidsupraleiter, MgB_2 -Verbundsupraleiter und andere empfohlen.

Zusätzlich können supraleitende Materialien, die in Stromzuführungen verwendet werden, verschiedene Formen annehmen wie z. B. Block, Verbund-Runddraht, Litzendraht, Verbund-Rechteckdraht, kompakter Litzendraht, Verbund-Band, laminiertes Band.

A.3.3 Assoziierte Materialien

- (1) Resistive Materialien: Aluminiumlegierungen, Silber, Silberlegierungen, Kupfer, Kupferlegierungen (Messing, Beryllium-Bronze etc.), rostfreier Stahl und weitere
- (2) Unterstützend: Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) und weitere
- (3) Elektrisch isolierende Materialien: GFK, Keramische Werkstoffe, Polyimidband

A.4 Charakterisierungen

Als Prüfgegenstände für Stromzuführungen können mechanische Tests wie der Biegetest, Dehnungstest, Vibrationstest, Falltest und Belastungstests rascher Abkühlung in flüssigem Stickstoff durchgeführt werden. Dies hängt von der Anwendung und der Spezifikation ab.